

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALORÍMETRO DE JUNKERS PARA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS

Martina, P. - Aeberhard, R. - Corace, J. - García Solá, E. - Bucki Wasserman B.,

G.I.D.E.R. - Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables -
Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Nordeste – Av. Las Heras 727 – 3500 – Resistencia - Chaco
Tel. 03722-420076 – Email: pablo@ing.unne.edu.ar

RESUMEN

Se presentan los primeros resultados obtenidos a través de un calorímetro de Junkers, diseñado y construido por el grupo G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), utilizado para determinar el poder calorífico de gases. Este dispositivo consiste básicamente en un intercambiador de calor tipo serpentina vertical, de cobre, por la cual fluye agua en forma descendente, ubicada en el interior de un cilindro de acero donde circulan, en sentido contrario, los humos de la combustión. Primeramente se realizaron ensayos con un gas conocido como el butano con el fin de calibrar el aparato. Posteriormente se llevaron a cabo experiencias con metano resultando el poder calorífico del mismo 47341,2 Kj/Kg. Si bien los valores hallados en forma práctica difieren ligeramente de los extraídos de la bibliografía, los mismos se consideran satisfactorios, teniendo en cuenta que son los primeros resultados obtenidos con el prototipo construido.

Palabras Clave: Calorímetro – Poder calorífico – biogás – metano - combustión

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de los estudios realizados por el grupo GIDER (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), respecto a la obtención de gas metano a partir de residuos orgánicos de la zona chaqueña, ha surgido la inquietud de conocer la energía entregada por el biogás. Dado que esta propiedad es importante para establecer el rendimiento térmico y económico de un combustible, se observó la necesidad de construir un dispositivo para determinar el poder calorífico.

Por definición se denomina poder calorífico a la cantidad de calor que se obtiene mediante la combustión completa de la unidad de masa o de volumen de un combustible, quedando los productos de la combustión a la temperatura a la que se encontraban inicialmente el combustible y el comburente, es decir que el poder calorífico es el calor de reacción de combustión realizada a temperatura constante.

Al producirse la combustión se produce una transformación de energía química del combustible en energía térmica. Dicha energía térmica puede transferirse en forma de calor al medio si la combustión se realiza en un recinto no adiabático o bien puede incorporarse como energía interna térmica a los productos de la combustión si se realiza en un ambiente adiabático.

Los combustibles que se emplean en la práctica normalmente contienen hidrógeno combinado y muchas veces también humedad. El agua que produce el primero, más la que constituye la humedad pasan a formar parte de los productos de la combustión. Según las condiciones en que se realice la combustión pueden ocurrir 3 cosas: i) que toda el agua que integra los productos de la combustión quede gaseosa (es decir en forma de vapor), ii) que toda el agua quede líquida o iii) que quede parcialmente líquida y parcialmente vaporizada (García, 2007). En cada uno de los casos la cantidad de calor que se obtendrá será diferente, por lo que se tendrá entonces una infinidad de poderes caloríficos, conjunto que tendrá dos valores extremos. Se define entonces como poder calorífico superior (H_s) al correspondiente al caso en que toda el agua producto de la combustión queda líquida y como poder calorífico inferior (H_i) al del caso en que toda el agua producto de la combustión queda gaseosa.

Los combustibles pueden ser quemados a volumen o a presión constante. En el caso de los gases generalmente, la determinación experimental del poder calorífico se lleva a cabo realizando la combustión a presión constante.

Existen diversas formas en las que se pueden determinar el poder calorífico de gases. Una es calculando en forma indirecta a través de un cromatógrafo de gases, que mide en forma exacta la composición del gas (porcentaje de metano, propano, butano, anhídrido carbónico, hidróxido de azufre, etc.), y luego se calcula el poder calorífico por medio de ecuaciones. Estos cromatógrafos, que son los utilizados por el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) para medir el poder calorífico del gas de red (ENARGAS, 2006) no sólo no realizan ensayos a terceros sino que no están disponibles en nuestra zona. En el año 2006 el grupo GIDER (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables) ensayó un método alternativo para determinar el poder calorífico del biogás (Martina et al., 2006) técnica que consistía en quemar, en idénticas condiciones de temperatura y presión, un volumen de gas cuyo poder calorífico quería determinarse y otro volumen igual de gas de poder

calorífico conocido. A través de este método se pudo calcular el poder calorífico del gas incógnita conociendo para ambos gases la variación de temperatura y las masas, además del poder calorífico del gas conocido.

Si bien este procedimiento alternativo permitió calcular el poder calorífico del biogás en forma aceptable, teniendo en cuenta la imposibilidad de contar con dispositivos más exactos, el mismo presentó discrepancias con respecto a la bibliografía. Esto pudo deberse a las pérdidas de calor al medio ambiente, a la desigualdad entre ambos rendimientos de combustión o a las diferentes relaciones estequiométricas aire-gas entre los dos ensayos.

Es por todo lo expuesto que se diseñó y construyó un calorímetro de Junkers (Didacta, 2006), que consiste básicamente en un intercambiador de calor tipo serpentina vertical, de cobre, por la cual fluye agua en forma descendente, ubicada en el interior de un cilindro de acero aislado donde circulan, en sentido contrario, los humos de la combustión. Este montaje está aislado del medio exterior mediante doble capa de membrana térmica de polietileno inyectado con aire. La disposición de ambos elementos constituye un intercambiador de calor vertical en contracorriente.

DESCRIPCION DEL EQUIPO

El Calorímetro de JUNKERS está formado por un intercambiador de calor tipo serpentina de cobre vertical (por la cual circula agua de arriba hacia abajo), montado dentro de un caño de acero vertical (por el cual circulan hacia arriba los humos de la combustión) de 114mm de diámetro externo, aislado del medio exterior mediante doble capa de membrana térmica de polietileno inyectado con aire. Estos 2 elementos van colocados uno dentro del otro (la serpentina dentro del caño), formando un intercambiador de calor en contracorrientes vertical.

La serpentina de cobre, dentro de la cual circula el agua, está formada con 18m de caño de cobre usado en refrigeración, de 9,8mm de diámetro externo y 7,5mm de diámetro interno, arrollado sobre sí mismo formando un cilindro-serpentina de 70 espiras y 900mm de altura, con 105mm de diámetro externo y 80mm de diámetro interno. A cinco alturas diferentes de la serpentina, se colocaron sendas chapas deflectoras que obstruyen parcialmente el pasaje de los gases (la mitad de la sección), de tal manera que los humos de la combustión vayan ascendiendo en forma lenta y zigzagueante, con el objeto de lograr el máximo intercambio de calor. Cabe aclarar que en los modelos observados en la bibliografía (Mesny, 2002), el pasaje de los gases se hacía en doble circuito, primero ascendente y luego descendente. Sin embargo, en nuestro prototipo hemos optado por el sistema de pasaje de gases en un solo sentido (ascendente), ya que de esta manera es más sencilla la construcción y más fácil la regulación. En las figuras 1 y 2 se observan imágenes de la serpentina de cobre y del equipo armado.



Figura 1: Serpentina de cobre



Figura 2: Vista del calorímetro de Junkers

La serpentina va colocada dentro de un caño de acero de 114mm de diámetro externo y 110,8mm de diámetro interno (espesor de pared = 1,6mm), siendo su longitud de 900mm. En la parte inferior del caño, se coloca un quemador de gas tipo mechero de Bunsen, colocado de forma tal de tener una combustión controlada y estequiométrica del combustible a ensayar. Este mechero de precisión y funcionamiento preciso, posee una regleta que le permite variar la cantidad de aire a utilizar, así como un visor para observar el color correcto de la llama durante la combustión (figura 3). Por encima del caño, se coloca un sombrerete cónico de material aislante con 2 orificios, de manera de permitir la salida de gases y posibilitar la medición de la temperatura final de los gases sin que influya en ésta la temperatura ambiente.

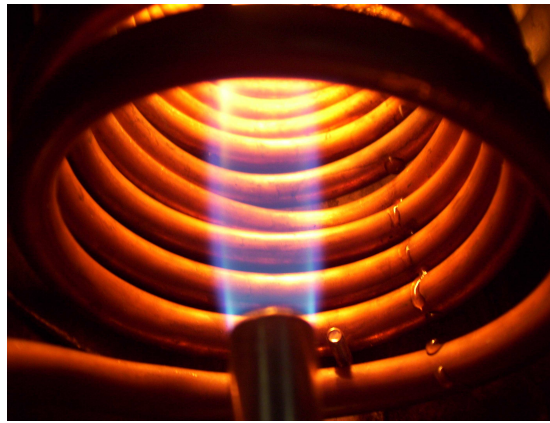


Figura 3: mechero de Bunsen quemando biogás

Todo el conjunto caño-serpentina-mechero de Bunsen está montado sobre un trípode que ubica la parte más baja del conjunto (parte inferior del mechero de Bunsen) a 180mm del suelo, espacio suficiente para colocar sensores, caños de salida de agua, mangueras de gas, etc. El caño tiene 2 perforaciones (a 300mm y a 600mm) que permiten la introducción de termocuplas para medir la temperatura de los humos en la zona media del intercambiador. En las figuras 4 y 5 se observan imágenes del equipo listo para un ensayo.

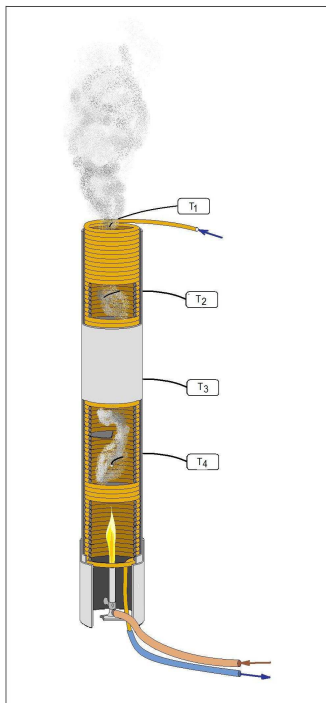


Figura 4: Esquema del equipo y ubicación de las termocuplas



Figura 5: Calorímetro listo para un ensayo

ENSAYOS Y CÁLCULOS REALIZADOS

Los ensayos se realizaron, como se indicó anteriormente, a presión constante. Una vez que el gas se quema en el mechero, los gases adoptan una circulación ascendente y son guiados pasando por el cilindro vertical formado por la serpentina, en cuyo interior circula agua en sentido contrario al movimiento de los gases.

Tanto el gas como el agua entran al calorímetro a temperatura ambiente, mientras que en todo momento se determinan las temperaturas de salida de ambos. Una vez que el dispositivo entró en régimen permanente (ya no varía la temperatura de salida del agua ni de los gases de combustión) y conociendo las temperaturas de salida y el peso del combustible, se efectúan los cálculos para determinar el poder calorífico del gas ensayado.

Se realizaron varios ensayos para ir perfeccionando el equipo y disminuir los errores en la medición. Uno de los ensayos se realizó con un gas conocido (butano puro) para comparar los datos obtenidos experimentalmente con los datos de bibliografía. A continuación se desarrollará uno de los ensayos realizados con biogás obtenido a partir de la digestión anaeróbica de heces de vacunos. La duración total del ensayo fue de 72 minutos, los primeros 45 minutos para calentar el equipo y llevarlo a régimen y luego el período de régimen permanente fue de 25 minutos, que es el tiempo considerado en los cálculos.

Cálculo de la masa de biogás utilizada en el régimen permanente.

Para determinar la masa del biogás se tuvo en cuenta la ecuación de los gases ideales:

$$P * V = m * R_p * T \quad (1)$$

donde R_p es la constante particular del biogás calculado en trabajos anteriores (Martina et al., 2005) e igual a 31,172 Kgf*m/Kg*K

Teniendo en cuenta que el volumen de gas consumido durante el ensayo fue de 27 dm³, la presión total (suma de las presión atmosférica y manométrica) $P_1 = 1,0359$ Kg/cm² y la temperatura ambiente 299,1 K se calculó la masa de gas cuyo valor fue de $m = 0,03$ Kg de biogás.

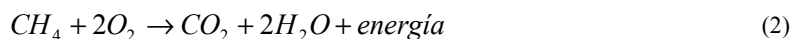
Cálculo de la masa de metano y de anhídrido carbónico:

Considerando que el biogás está formado por un 60% de metano y un 40% de CO₂ (se midió con aparato de Orsat):

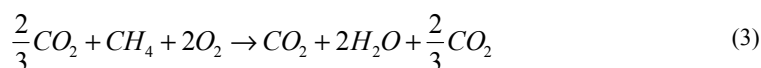
$$m_{CH_4} = 0,018 \text{ Kg} \quad \text{y} \quad m_{CO_2} = 0,012 \text{ Kg}$$

Cálculo de la masa de humos teórica generada por la combustión estequiométrica del biogás:

Combustión estequiométrica del metano (Reboiras, 2006):

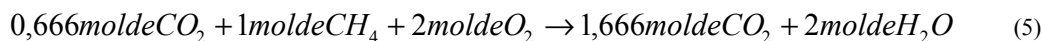
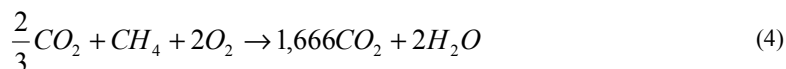


Si a (2) sumamos el CO₂ ya que se considera que 60% es metano y 40% CO₂:



El CO₂ agregado no aporta calorías y actúa como moderador de la combustión.

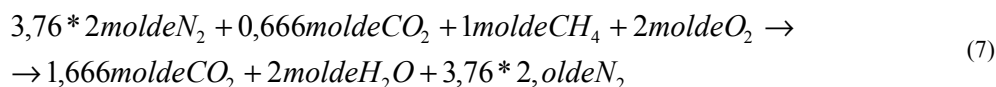
Ordenando la ecuación anterior:



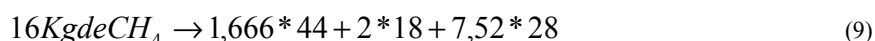
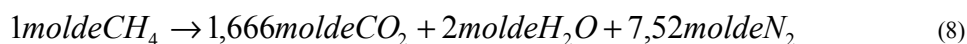
Teniendo en cuenta que el N también forma parte del aire según la siguiente relación:

$$[\text{molesde} N_2 = 3,76 * \text{molesde} O_2] \quad (6)$$

Y sumando a (5) el N₂:



De la ecuación anterior si:



Por lo tanto si: $16 \text{Kgde} CH_4 \rightarrow 319,864 \text{Kgde} \text{humos}$

entonces: $0,018 \text{Kgde} CH_4 \rightarrow 0,35984 \text{Kgde} \text{humos}$

Es decir que la masa de humos generada por la combustión estequiométrica de 0,018 Kg de CH₄ es de $m_{\text{H}} = 0,35984$ Kg.

Cálculo de la masa de humos real generada por la combustión del biogás:

Para el cálculo de la masa de real de humos se supuso la utilización de un 10% más de aire que el estequiométricamente necesario. Por lo tanto:

$$m_{\text{Humos}} = 1,1 * m_{iH} = 1,1 * 0,35984 = 0,3958 \text{ Kg}_{\text{Humos}} \quad (10)$$

Cálculo del calor absorbido por los humos:

El calor absorbido por los humos será:

$$Q_{AH} = m_{RH} * c_{p \text{ Humos}} * \Delta t_H \quad (11)$$

Donde: $c_{p \text{ Humos}} = 0,24 \text{ Kcal} / \text{KgK}$

$$\Delta t_H \left(\begin{array}{l} t_e = 26,1^\circ \text{C} \\ t_{s \text{ Humos}} = 31,4^\circ \text{C} \end{array} \right)$$

Entonces $Q_{AH} = 2,1073 \text{ KJ}$

Cálculo del calor absorbido por el agua que circula por la serpentina de cobre:

$$Q_{AH_2O} = m_{H_2O} * c_p * \Delta t_{H_2O} \quad (12)$$

Donde: $m_{H_2O} = 135,3 \text{ l}$ fue determinada al final del ensayo.

$$\Delta t_{H_2O} \left(\begin{array}{l} t_e = 24,4^\circ \text{C} \\ t_s = 25,6^\circ \text{C} \end{array} \right)$$

Entonces $Q_{AH_2O} = 679,606 \text{ KJ}$

Cálculo del Poder Calorífico del metano:

En la determinación del poder calorífico se tuvo en cuenta que al finalizar el ensayo no quedó agua líquida en el quemador, por lo tanto el valor calculado está referido al Poder Calorífico Inferior.

$$PCI_{CH_4} * m_{CH_4} = \frac{Q_{ABS}}{\eta_{TQ}} = \frac{Q_{AH} + Q_{AH_2O}}{\eta_{TQ}} \quad (13)$$

Donde η_{TQ} es el rendimiento de la transmisión de calor. En los cálculos se tuvo en cuenta que el rendimiento de la transmisión de calor fue de 80%, ya que no todo el calor cedido fue absorbido por el agua o los humos. Esto se debe a las irreversibilidades propias del proceso de transferencia del calor (diferencia de temperaturas finita) y a factores de diseño y utilización del equipo (fallas o insuficiencia en la aislación térmica, combustión deficiente, serpentina sucia con hollín). El valor de 80% es el típico rendimiento para intercambiadores del tipo mechero-serpentina, y fue obtenido de la bibliografía especializada (ASHRAE, 1996).

Finalmente: $PCI_{CH_4} = 47341,2 \text{ KJ} / \text{Kg}$

CONCLUSIONES

Primeramente se realizaron ensayos para determinar el poder calorífico del butano puro, gas de poder calorífico bien conocido y que sirvió a modo de combustible patrón para calibrar el equipo. El valor obtenido fue de 46960 KJ/Kg, valor que coincide prácticamente con el valor de bibliografía. Posteriormente se llevaron a cabo experiencias con metano resultando el poder calorífico del mismo 47341,2 KJ/Kg, que representa un error del 5,32% (por defecto) con respecto al valor de bibliografía.

Próximamente se realizarán más ensayos para ajustar más este valor. Se tratará de mejorar la aislación y también se tratará de que los gases de escape salgan a menor temperatura (aumentando el caudal de agua).

Si bien los valores hallados en forma experimental difieren ligeramente de los extraídos de la bibliografía ya que para el butano es de 45600 Kj/Kg., y para el metano 50000 Kj/Kg aproximadamente (Moran et al. 1998), los resultados calculados se consideran satisfactorios, teniendo en cuenta que son los primeros resultados obtenidos con el prototipo construido.

Las divergencias entre los valores experimentales y bibliográficos, debidas posiblemente a las pérdidas de calor al medio, desigualdad entre los rendimientos de combustión, diferentes relaciones estequiométricas aire-gas entre los ensayos, etc., serán estudiadas en futuros trabajos con el objeto de ajustar el método y hacerlo más preciso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- García, C., Termodinámica Técnica, Editorial Alsina, (2003), p.p. 318
Enargas (2006) http://www.metrogas.com.ar/news_gnc01.htm (4-mayo-2006)
Martina P., Corace J., Aeberhard R., García Sola E. (2006) Propuesta de un método experimental alternativo para la determinación del poder calorífico del biogas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol 10, ISSN 0329-5184
Didacta (2006) http://www.didacta.it/relazioni/CE_T136d_S.pdf (4-junio-2006)
Mesny M., Generación del Vapor, Ediciones Marymar (2002) p.p. II-46 y II-47
Martina P., Yank L., Corace J., Bucki Wasserman B., Aeberhard R. (2005) Estudio de la producción de biogas en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor del tipo de carga única o batch. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol 9, ISSN 0329-5184
Reboiras, M., Química, la ciencia básica, Editorial Thomson, Universidad Autónoma de Madrid, (2006), p.p. 1062
Moran M., Shapiro H., Fundamentos de Termodinámica Técnica, Editorial Reverté, Barcelona, (1998) p.p. 794
ASHRAE, 1996 ASHRAE HANDBOOK, HVAC Systems and Equipment, SI Edition. pp 43.5

ABSTRACT

We present the first results obtained from a Junkers calorimeter, designed and built by the group G.I.D.E.R. (Research and Development Group on Renewable Energies), used to determine the calorific power of gases. This device is basically a vertical serpentine heat exchanger, of copper, water which flows downwards, located inside a steel cylinder, which circulate in the opposite direction, the smoke of combustion. First tests were performed with a gas known as butane to calibrate the device. Later experiments were conducted with methane resulting in a calorific power of 47341.2 KJ / KG. Although the values found in practically differ slightly from those from the literature, they are considered satisfactory, bearing in mind they are the first results obtained with the prototype built.

Keywords: Calorimeter – Calorific power - biogas - methane – combustion